

УДК 378:004

DOI: 10.25686/978-5-8158-2474-4-2025-305-318

Верификация системы оптического моделирования Lumicept по тестовым сценариям CIE 171:2006

Е. Д. Бирюков¹, М. С. Копылов¹, В. Г. Соколов², И. С. Потемин², А. Г. Волобой¹

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Данная статья описывает прохождение поверки системы оптического моделирования Lumicept, вычислительное ядро которой написано специалистами ИПМ и ИТМО, с помощью тестовых сценариев, разработанных Международной комиссией по освещению (CIE) в рамках стандарта CIE 171:2006. В статье кратко рассматриваются другие известные методы верификации систем оптического моделирования, используемых в различных инженерных и научных расчетах. Представлен обзор существующих подходов, включая сравнение с натурными измерениями и использование стандартизованных бенчмарков. Также описаны особенности алгоритмов моделирования в системе Lumicept и их влияние на процедуру тестирования и результаты. Представлены результаты верификации системы Lumicept с использованием тестовых сцен CIE, продемонстрировавшие успешное прохождение тестов и конкурентоспособную точность результатов. В ходе анализа выявлены возможные причины отклонений от эталонных значений в отдельных тестах, что указывает на необходимость дальнейших исследований в области методов верификации и уточнения эталонных данных для спорных тестовых сценариев.

Ключевые слова: оптическое моделирование, симуляция освещения, физически корректный рендеринг, трассировка лучей, верификация программного обеспечения, тесты оптического моделирования, Международная комиссия по освещению, CIE 171:2006

Validation of Lumicept optical modeling system against CIE 171:2006 test cases

E. D. Birukov¹, M. S. Kopylov¹, V. G. Solokov², I. S. Potyomin², A. G. Voloboy¹

¹Keldysh Institute of Applied Mathematics, Moscow, Russia

²ITMO University, St. Petersburg, Russia

Abstract. This paper describes the validation of the Lumicept optical modeling software against test cases developed by the International Commission on Illumination (CIE) within the framework of the CIE 171:2006 standard. The paper briefly reviews other known methods for assessment of optical modeling systems used in various engineering and scientific calculations. An overview of existing approaches is provided, including comparison with natural measurements and usage of standardized benchmarks. The features of the simulation algorithms in the Lumicept system and their impact on the testing procedure and its results are also described. The results of validation of the Lumicept system against CIE test cases are presented, demonstrating successful completion of the tests and competitive accuracy of the results. The analysis revealed possible causes of deviations from the reference values in individual tests, which indicates the need for further research in the field of validation methods and refinement of the reference data for controversial test scenarios.

Keywords: optical modeling, lighting simulation, physically accurate rendering, raytracing, software validation, optical modeling test cases, International commission on Illumination, CIE 171:2006.

Введение

Современные методы моделирования распространения света находят широкое применение в разнообразных инженерных и научных дисциплинах. Методы, основанные на принципах физической оптики, позволяют создавать виртуальные модели, точно воспроизводящие взаимодействие света с различными объектами и средами. Одним из наиболее известных и востребованных методов для расчета освещенности сейчас является трассировка лучей. Вторым широко распространенным методом является метод конечных элементов (Radiosity), который, к примеру, был положен в основу широко известного пакета Radiance.

Ключевым преимуществом данных методов является их способность обеспечивать физически корректные результаты симуляций. Это делает их незаменимыми в тех областях, где требуется высокая точность при вычислениях яркости, освещенности, спектрального состава света и других физических величин. Примерами таких задач могут служить разработка современных осветительных приборов, где требуется оптимизация светового потока и минимизация потерь, проверка соответствия производственных и офисных помещений санитарным нормам по освещенности и т.д.

Однако следует отметить, что корректность моделирования в значительной степени определяется рядом факторов, включающих особенности конкретной реализации выбранного метода, сложность геометрии моделируемой сцены, поддержку различных свойств поверхностей и сред, а также правильность задания источников света, включая источники со сложным пространственным распределением параметров. В частности, для точного моделирования естественного освещения необходимо учитывать особенности модели неба, используемой в расчетах, поскольку от этого напрямую зависит распределение яркости и спектрального состава света, поступающего в помещение. Например, небесное освещение можно задать с помощью специальной гониометрической диаграммы, которая содержит информацию об угловом распределении яркости такого освещения, а также в некоторых случаях и об угловом распределении его цвета.

С точки зрения конечного пользователя, будь то инженер, занимающийся разработкой осветительных приборов, специалист по эргономике, оценивающий комфортность рабочей среды, или архитектор, стремящийся создать гармоничное и функциональное пространство, вопрос точности и повторяемости результатов симуляции является первоочередным при выборе того или иного пакета оптического моделирования [1]. Именно от корректности получаемых результатов напрямую зависит применимость выбранной программы (системы) оптического моделирования для решения практических задач. Это, в свою очередь, делает задачу верификации вычислительного ядра системы оптического моделирования освещения, то есть проверки соответствия алгоритмов и моделей, лежащих в основе системы, реальным физическим процессам, весьма важной и актуальной.

Методы поверки и тестирования программного обеспечения в области оптического моделирования

С тех пор как системы оптического моделирования стали применяться в практических расчетах в промышленности, возникла потребность каким-либо образом верифицировать результаты их работы. Это особенно важно в тех случаях, когда такие системы применяются при проектировании устройств, дефекты в которых могут повлечь за собой серьезные негативные последствия, например, автомобильных фар, которые в случае ошибок при проектировании будут слепить водителей встречных транспортных средств. Поэтому было разработано большое количество различных методов поверки, тестирования и сравнения точности работы программ оптического моделирования.

Изначально одним из наиболее распространенных подходов к оценке точности программного обеспечения для моделирования освещения являлось прямое сравнение результатов моделирования с данными натурных измерений. Этот метод предполагает сравнение результатов, полученных с использованием различных программных пакетов, с измерениями, проведенными в реальных помещениях или на физических моделях. Такой подход позволяет оценить точность моделирования в конкретных условиях и выявить факторы, которые могут влиять на результаты. Например, в работе [2] авторы использовали фотографию большого динамического диапазона и данные спектрофотометрических измерений неба в реальных условиях для оценки точности различных моделей неба, используемых при симуляции освещения в библиотеке libRadtran.

Аналогичные исследования проводились и для других программных пакетов, таких как Lark [3], Evalglare [4], INLUX [5]. Это позволило получить более полное представление о сильных и слабых сторонах различных инструментов моделирования освещения и выявить факторы, влияющие на точность результатов.

С развитием технологий и накоплением опыта в области моделирования освещения возникла потребность в стандартизации методов поверки. Это привело к разработке различных бенчмарков, представляющих собой специализированные наборы данных и методик для оценки точности программного обеспечения.

Одним из примеров подобных бенчмарков является BRE-IDMP (Building Research Establishment – International Daylight Measurement Programme), разработанный в 2000 году [6]. Этот бенчмарк представляет собой специализированный набор данных, включающий 3D-модели офисных помещений с различными типами оконных проемов, материалами отделки и расположением мебели, что позволяет имитировать разнообразные сценарии освещения. В отличие от физических моделей,

которые, как показывают исследования, склонны к переоценке освещенности, особенно при пасмурном небе, BRE-IDMP предоставляет данные, полученные в полноразмерных моделях офисных помещений, что повышает надежность результатов. Предоставляя измеренные или аналитически рассчитанные значения освещенности, BRE-IDMP служит стандартизированной основой для сравнения результатов, полученных с использованием различных программных пакетов, и в результате способствует повышению достоверности результатов проектирования освещения.

Другим инструментом для валидации систем оптического моделирования является бенчмарк, разработанный Шрегле и Винольдом в 2004 году [7]. Ключевой особенностью этого бенчмарка является акцент на точной передаче свойств поверхностей за счет использования двунаправленных функций отражательной способности (Bidirectional Reflectance Distribution Function – BRDF). В отличие от упрощенных моделей, использующих однородные коэффициенты отражения, BRDF позволяют учитывать зависимость отражения света от угла падения и угла наблюдения, что особенно важно для материалов с выраженной текстурой или глянцевой поверхностью. Бенчмарк Шрегле и Винольда включает в себя как геометрические модели помещений, так и детальные измерения BRDF для различных материалов, полученные с использованием гониофотометра, а также методы устранения артефактов при измерении BRDF и оценки погрешностей, связанных с использованием BRDF, полученных посредством передискретизации. Валидация, проведенная авторами с использованием методов прямой и обратной трассировки лучей (Photon map и Radiance соответственно), подтвердила, что оба алгоритма решают уравнение рендеринга со сравнимой точностью и что полученные результаты соответствуют измерениям в пределах допустимых погрешностей.

Можно также упомянуть бенчмарк, разработанный при содействии компании Autodesk [8] и изначально предназначенный для тестирования алгоритмов оптического моделирования, также разработанных в данной компании. Этот бенчмарк специализируется на расчетах освещенности помещения естественным светом через окна. Как и предыдущие упомянутые бенчмарки, этот бенчмарк использует в качестве эталона данные, полученные путем реальных измерений некоторых существующих помещений.

Однако на настоящий момент наиболее популярным и признанным бенчмарком является набор аналитических тестов, разработанный под руководством F. Maamari по заданию Международной комиссии по освещению (CIE) [9], получивший в конечном варианте наименование CIE 171:2006. Особенностью этого бенчмарка является тот факт, что часть его тестов основана на сравнении результатов моделирования не с реальными измерениями, а с эталонными значениями, полученными аналитическим путем. Это позволяет сфокусироваться на проверке соблюдения физических законов освещения в программном обеспечении.

Основной целью данного набора тестов является оценка корректности реализации различных аспектов оптического моделирования в программном обеспечении, таких как корректное задание характеристик источников света, точный расчет прямых и многократных переотражений света от различных поверхностей, и правильный учет влияния геометрии помещения на распределение света. Особое внимание в данном бенчмарке уделяется сложным сценариям, представляющим наибольшую трудность для корректного моделирования, например освещению внутреннего помещения небесной полусферой через небольшое окно. Анализ результатов, полученных для различных программ, показывает, что высокая точность в отношении одного аспекта моделирования не гарантирует точность в других аспектах. Аналитический метод тестирования, то есть использование в качестве эталонных результатов не реальных измерений, а значений, полученных с помощью аналитических вычислений, является особенно важным при валидации моделей дневного освещения, поскольку яркость при дневном освещении зависит от большого количества факторов, в том числе случайных, например количества и расположения облаков, и поэтому добиться повторяемости экспериментальных измерений при дневном освещении очень сложно.

Все эти особенности тестовой модели CIE 171:2006 подчеркивают ее ценность для определения области применимости каждой конкретной программы. Благодаря своей аналитической (или эталонной) природе и акценту на проверке фундаментальных аспектов оптического моделирования, данный бенчмарк является важным инструментом для оценки и сравнения различных программных средств.

Следует отметить, что, несмотря на наличие стандартизованных бенчмарков, сравнение результатов моделирования с данными натурных измерений по-прежнему используется для оценки точности программного обеспечения для моделирования освещения. Однако в рамках данной работы мы сосредоточимся на тестах, разработанных CIE, как наиболее авторитетных и комплексно охватывающих различные аспекты моделирования освещения.

Описание тестовых сценариев CIE 171:2006

Все тестовые сценарии CIE 171:2006 разделены на несколько групп. Первая группа представляет собой набор из 6 простейших экспериментальных тестов (отмеченных индексами 4.1 – 4.6), в которых результаты симуляции в тестируемом программном обеспечении сравниваются с экспериментальными результатами, полученными путем реального воссоздания объектов с заданными свойствами поверхностей, размещения реальных источников освещения и проведения измерений освещенности в заданных точках с помощью физических измерительных приборов. Различия отдельных тестов внутри этой группы сводятся исключительно к разным координатам источников света и несколько отличающимся коэффициентам отражения в свойствах материалов для объектов сцены.

Вторая группа представляет собой так называемые аналитические тесты. Их общее отличие от тестов первой группы сводится к тому, что эталонные значения освещенности были получены не путем реальных физических измерений, а путем аналитических вычислений с использованием базовых формул геометрической оптики. При этом отдельные тесты данной группы предназначены для тестиования самых разных возможностей оптического моделирования, поэтому они имеют большие отличия друг от друга в геометрии объектов, видах и расположениях источников света (искусственные источники света различной формы, а также естественное освещение), свойствах поверхностей (включая не только отражающие, но и преломляющие поверхности), а также в вычисляемых физических величинах, которые включают в себя не только освещенность в заданных точках, но и световой поток, значения светопропускания для материалов поверхностей и т.д. Следует отметить, что по сведениям, полученным от Международной комиссии по освещению, в действительности только в части тестов этой группы (это тесты, отмеченные индексами 5.2–5.8) эталонные значения были получены чисто аналитическим путем. Что касается тестов с индексами 5.9–5.14, то для них эталонные значения были получены с помощью симуляции в существующей системе оптического моделирования, которая успешно прошла другие тесты и поэтому считалась корректной.

Третья группа не содержит конкретных описаний тестовых сцен. В ней содержатся только предложения по сценариям проведения некоторых дополнительных тестов. Эталонные значения для данных сценариев, как и для тестов второй группы, предлагается получать аналитическим путем. При этом главным критерием успешного прохождения теста является симметричность результатов.

CIE разработала общие правила, которые применяются ко всем тестовым сценариям. Они сводятся к максимальному упрощению данных, используемых для тестиирования. Геометрия тестовой сцены должна представлять собой простую комнату в форме параллелепипеда без каких-либо внутренних дополнительных объектов. В тестах, рассматривающих дневное освещение, комната должна включать единственное отверстие, через которое дневной свет проникает в нее. В тестах на искусственное освещение количество источников света должно быть минимальным. Свойства поверхностей для стен в комнате должны по возможности обеспечивать только диффузное отражение света, а также желательно, чтобы они были спектрально нейтральными [10].

В настоящей работе мы рассматриваем проведение тестов только из первой группы. Это базовые тесты, и они считаются наиболее надежными. Ранее CIE выдавала официальные сертификаты об успешном прохождении этих тестов компаниям-разработчикам систем оптического моделирования, где упоминались только тесты первой группы.

1. Общее описание тестовых примеров 1 группы

Тестовый набор состоит из 6 тестов, которые в официальном документе CIE отмечены номерами 4.1–4.6. Как уже было упомянуто, геометрия сцены является одинаковой во всех 6 тестах и представляет собой комнату в форме параллелепипеда с расстояниями между стенами 6.78 м по оси X, 6.72 м по оси Y и высотой от пола до потолка 3.24 м. Также одинаковыми являются координаты точек, в которых производится измерение освещенности. Эти точки расположены на одной плоскости,

параллельной полу и потолку, на расстоянии 0.8м от пола. Точки образуют решетку размерностью 7x7. Различия между тестами сводятся к параметрам материалов стен, пола и потолка комнаты, а также к положению и параметрам источников света.

2. Параметры материалов и источников света в тестовых сценах

Для всех 6 тестовых сцен заданы параметры отражательной способности пола, потолка и стен, которые являются постоянными на всей площади соответствующей поверхности. Значения отражательной способности приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры материалов сцен из группы тестов 4.1–4.6

Поверхность	Средняя отражательная способность	Допустимое отклонение отражательной способности
Тест 4.1		
Потолок	0.70	0.01
Пол	0.06	0.01
Стены	0.40	0.02
Тест 4.2		
Потолок	0.70	0.01
Пол	0.06	0.01
Стены	0.52	0.02
Тест 4.3		
Потолок	0.70	0.01
Пол	0.06	0.01
Стены	0.52	0.02
Тесты 4.4, 4.5 и 4.6 (одинаковые значения)		
Потолок	0.03	0.01
Пол	0.06	0.01
Стены	0.40	0.01

Во всех примерах имеются 4 источника света. Координаты положения их центральных точек по осям X и Y одинаковые (табл. 2).

Таблица 2. Положение источников света в сценах из группы тестов 4.1–4.6

Источник	Координата по оси X	Координата по оси Y
1	1.695м	1.680м
2	1.695м	5.050м
3	5.085м	1.680м
4	5.085м	5.040м

Отличия сводятся к форме источников света и их положению по оси Z:

- *примеры 4.1. и 4.4.* Точечные источники света. Координата всех источников по оси Z составляет 3.14 м. Световой поток каждого источника составляет примерно 2200 лм (точные данные приведены в описании теста);
- *примеры 4.2. и 4.5.* Источники света, имеющие форму круга с диаметром 450 мм. Координата всех источников по оси Z одинаковая – 3.20 м. Световой поток источников находится в пределах от 1800 до 2100 лм (точные данные приведены в описании теста);
- *примеры 4.3 и 4.6.* Источники света, имеющие форму квадрата с размерами 600x600 мм. Координата всех источников по оси Z одинаковая – 3.20 м. Световой поток каждого источника составляет примерно 4100 лм (точные данные приведены в описании теста).

Описания тестов также содержат таблицы с эталонными значениями освещенности в заданных точках и допустимыми пределами отклонения этих значений. Пределы отклонения учитывают все возможные погрешности как при построении эталонной сцены и реальных физических измерениях, так и при симуляции в тестируемой программе.

Особенности моделирования в системе Lumicept и влияние этих особенностей на проведение тестов

Геометрия сцены в системе Lumicept [11], вычислительное ядро которой написано специалистами ИПМ и ИТМО, представлена в виде треугольной сетки. Возможность представления геометрии в аналитическом виде (т.е. через задание уравнений, описывающих поверхности различной формы) отсутствует. Такой способ представления геометрии является оптимальным с целью упрощения вычислений при оптическом моделировании. Этот способ является не самым удобным для проектирования геометрических данных «с нуля», однако система Lumicept предназначена только для моделирования глобального освещения и других оптических и светотехнических расчетов и не предназначена для непосредственного создания геометрических моделей. Геометрия импортируется из файлов популярных систем автоматизированного проектирования (CAD), таких как AutoCAD или CATIA. Если импортируемые данные содержат геометрические объекты, заданные в аналитической форме, то на стадии импорта производится их тесселляция, т.е. разбиение на треугольники с некоторой заданной точностью. Для большинства файловых форматов импорт производится только из заранее сохраненных исходных файлов. Однако для системы CATIA было разработано специальное дополнение (plug-in), представляющее собой ядро системы Lumicept, встроенное непосредственно в графический интерфейс этой системы. Следует заметить, что для уже загруженной в систему Lumicept геометрии в виде набора треугольников возможно дополнительное разбиение на треугольники меньшего размера. Координаты промежуточных вершин при этом вычисляются по некоторой интерполяции, при которой принимается, что поверхности, подвергаемые дополнительному разбиению, являются гладкими.

Для получения значений освещенности в некоторых произвольных точках пространства сцены в системе оптического моделирования Lumicept используются расчет глобального освещения по методу Монте-Карло. Данный метод выдает результат с некоторой точностью, непрерывно увеличивающейся в процессе вычисления. Базовыми критериями для остановки симуляции по методу Монте-Карло являются достижение заданной точности вычислений либо превышение заданного времени симуляции. Кроме того, могут использоваться дополнительные критерии, например получение в процессе симуляции заданного количества лучей света. Следует обратить внимание на то, что вычисления по методу прямой Монте-Карло трассировке лучей не предоставляют возможности получить точное значение освещенности в какой-то конкретной точке пространства. Это вызвано тем, что лучи трассируются в случайных направлениях и невозможно попасть в заданную конкретную точку пространства за конечное время. Вместо этого можно получить среднее значение освещенности на некоторой поверхности, имеющей определенную площадь.

Чтобы получить значение освещенности некоторой поверхности, произвольно расположенной в пространстве, в системе Lumicept существуют так называемые виртуальные измерительные приборы. Они представляют собой сетки различной формы, состоящие из ячеек. Для ячейки такого прибора вычисляется ее средняя освещенность, равная отношению светового потока, попавшего в данную ячейку, к площади всей этой ячейки. Как правило, в оптических расчетах требуются измерительные приборы, содержащие большое количество ячеек. Однако в нашем случае, когда требуется измерить освещенность в нескольких определенных точках, расположенных на значительном расстоянии друг от друга, приходится использовать отдельный виртуальный измерительный прибор, состоящий из единственной ячейки, для каждой точки измерений. Размер ячейки был подобран опытным путем. Он должен быть значительно меньше расстояния между соседними приборами, но при этом обеспечивать достаточную точность в расчетах по методу Монте-Карло.

Результаты тестирования

Как уже было упомянуто, моделирование на тестовых сценах проводилась по методу Монте-Карло. В качестве основного критерия для остановки вычислений по методу Монте-Карло была выбрана погрешность вычислений, которая в первоначальном варианте составила 1 % для всех тестовых примеров.

После первоначального запуска тестовых сценариев с исходными параметрами оказалось, что в большинстве случаев результаты укладывались в допустимые пределы. Однако в двух тестовых

сценариях значения освещенности в некоторых точках вышли за эти пределы. В данной работе приведены полные таблицы результатов тестирования для двух сценариев – 4.1 (полностью успешный случай) и 4.2 (частичный выход за допустимые пределы). Для остальных тестов будет приведена только общая информация о полученных в результате моделирования значениях средней освещенности сцены и их допустимых пределах, а также о количестве точек, в которых значения вышли за допустимые пределы. В таблицах результатов для тестов 4.1 и 4.2 TE UL / TE LL являются верхним и нижним пределами допустимых значений с учетом полной возможной погрешности, а MB UL / LL – верхний и нижний пределы допустимых значений с учетом только измерительных ошибок.

Тест 4.1

Таблица 3. Подробные результаты тестирования для сценария 4.1

Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	91	107	115	118	116	107	93
MB UL	85	100	108	110	108	100	87
1	68	79	87	87	87	81	70
MB LL	65	77	83	85	83	77	67
TE LL	59	70	75	77	76	70	61
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	103	124	130	129	129	124	105
MB UL	96	116	122	120	121	116	98
2	78	92	98	96	97	94	78
MB LL	74	89	94	93	93	89	75
TE LL	67	81	85	84	84	81	68
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	112	132	141	141	141	131	113
MB UL	105	123	132	132	132	122	106
3	87	98	105	107	106	100	87
MB LL	81	95	101	102	101	94	81
TE LL	73	86	92	92	92	86	74
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	115	133	143	146	143	133	116
MB UL	108	124	133	137	133	124	108
4	89	101	109	108	108	99	86
MB LL	83	96	103	105	103	96	83
TE LL	75	87	93	96	93	87	76
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	113	132	141	140	141	132	112
MB UL	105	124	131	131	131	123	105
5	87	98	106	107	106	99	86
MB LL	81	95	101	101	101	95	81
TE LL	74	86	92	92	92	86	73
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	103	124	130	127	130	123	104
MB UL	97	116	121	119	121	115	97
6	79	92	98	98	99	93	79
MB LL	74	89	93	92	93	89	75
TE LL	68	81	85	83	85	81	68

Окончание таблицы 3

Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	92	108	116	117	115	108	92
MB UL	86	100	108	109	107	100	86
7	69	81	87	89	88	81	69
MB LL	66	77	83	84	83	77	66
TE LL	60	70	76	76	75	70	60

Как можно видеть из таблицы 3, все значения попали в интервал между верхним и нижним пределами допустимых значений, предоставленных CIE. Время выполнения теста составило 1 час 53 минуты 26 секунд, при этом было обработано примерно 9,2 миллиарда лучей.

Test 4.2

Таблица 4. Подробные результаты тестирования для сценария 4.2

Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	50	68	66	60	66	68	51
MB UL	47	63	62	56	61	63	48
1	36	48	48	45	48	48	37
MB LL	36	49	48	43	47	49	37
TE LL	33	44	43	39	43	44	33
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	65	93	88	77	87	93	67
MB UL	61	87	83	72	81	87	62
2	47	64	63	56	63	65	48
MB LL	47	67	64	55	63	67	48
TE LL	43	61	58	50	57	61	44
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	65	90	87	77	85	90	66
MB UL	61	84	81	72	80	84	62
3	47	63	62	58	63	64	49
MB LL	47	65	62	56	61	65	48
TE LL	42	59	57	50	56	59	43
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	61	79	77	72	77	79	61
MB UL	57	74	72	67	72	73	57
4	44	56	57	55	60	59	47
MB LL	44	57	55	52	55	56	44
TE LL	40	52	50	47	50	51	40
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	66	89	85	75	83	87	64
MB UL	61	83	79	70	78	82	60
5	47	62	63	59	66	68	52
MB LL	47	64	61	54	60	63	46
TE LL	43	58	55	49	54	57	42
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	65	92	85	74	83	89	63

Окончание таблицы 4

Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
MB UL	61	86	80	69	78	83	59
6	47	65	63	59	68	71	52
MB LL	47	66	61	53	60	64	46
TE LL	43	60	56	48	54	58	41
Position	Sensor						
	1	2	3	4	5	6	7
TE UL	50	66	64	57	62	64	48
MB UL	47	62	60	54	58	60	45
7	37	47	49	46	52	52	41
MB LL	36	48	46	41	45	46	35
TE LL	33	43	42	38	41	42	31

В результате выполнения данного теста оказалось, что некоторые значения выходят за пределы допустимых значений с учетом измерительных ошибок, предоставленных CIE. В таблице 4 такие значения отмечены желтым цветом. Возможные причины появления подобных результатов и попытки улучшения вычислительных алгоритмов, которые должны были помочь добиться приведения результатов к допустимым значениям, будут описаны в следующем разделе.

Время выполнения теста составило 1 час 15 минут 20 секунд, при этом было обработано примерно 9,7 миллиарда лучей.

Test 4.3

Таблица 5. Общие результаты тестирования для сценария 4.3

Верхний предел допустимых значений	254.2
Среднее значение освещенности в комнате	234.8
Нижний предел допустимых значений	199.8

Все значения попали в интервал между верхним и нижним пределами допустимых значений (табл. 5), предоставленных CIE. Время выполнения теста составило 55 минут 26 секунд, при этом было обработано примерно 7,5 миллиарда лучей.

Test 4.4

Таблица 6. Общие результаты тестирования для сценария 4.4

Upper limit	37.5
Simulated mean room illuminance	36.0
Нижний предел допустимых значений	29.5

Все значения попали в интервал между верхним и нижним пределами допустимых значений (табл. 6), предоставленных CIE. Время выполнения теста составило 3 часа 21 минуту 39 секунд, при этом было обработано примерно 31,6 миллиарда лучей.

Test 4.5

Таблица 7. Общие результаты тестирования для сценария 4.5

Верхний предел допустимых значений	51.1
Simulated mean room illuminance	43.1
Нижний предел допустимых значений	40.1

Все значения попали в интервал между верхним и нижним пределами допустимых значений (табл. 7), предоставленных CIE. Время выполнения теста составило 5 часов 39 минут 18 секунд, при этом было обработано примерно 27,2 миллиарда лучей.

Тест 4.6**Таблица 8. Общие результаты тестирования для сценария 4.6**

Верхний предел допустимых значений	228.5
Simulated mean room illuminance	212.7
Нижний предел допустимых значений	179.5

Три значения из 49 вышли за допустимые пределы (табл. 8). Время выполнения теста составило 3 часа 30 минут 28 секунд, при этом было обработано примерно 31,5 миллиарда лучей.

Анализ результатов тестов в случаях выхода за допустимые пределы

Следует обратить особое внимание на тесты 4.2 и 4.6, результаты которых для некоторых точек оказались за пределами интервала, который считается допустимым. Чтобы улучшить результаты этих тестов, было предпринято несколько попыток изменения различных вычислительных настроек и параметров представления сцены. В данном разделе описываются работы применительно к тесту 4.2, поскольку для теста 4.6 ситуация аналогичная.

Первоначально были предприняты попытки следующих действий для улучшения результатов теста:

- увеличение точности вычислений за счет более длительных вычислений;
- изменение размеров ячеек виртуальных измерительных приборов;
- изменение степени разбиения геометрии сцены.

1. Увеличение точности вычислений

Было произведено несколько вычислений со следующими значениями погрешности моделирования: 2 %, 1.5 %, 1 %, 0.75 %, 0.5 %. Время вычисления составило от 19 минут 57 секунд для погрешности 2 %, до 5 часов 1 минуты 59 секунд для погрешности 0.5 %. Поскольку для каждой точки измерения был задан отдельный виртуальный измерительный прибор, на котором достигнутая в определенный момент времени точность вычислений может отличаться от точности, достигнутой в тот же момент времени на других приборах, то было принято решение выбрать в качестве критерия точность (погрешность) вычисления на приборе, находящемся в левом верхнем углу сцены. Эксперимент показал, что увеличение точности в указанном диапазоне слабо влияет на результаты вычислений (табл. 9).

Таблица 9. Проведение теста по сценарию 4.2 с различной точностью вычислений

Погрешность	Номер сенсора	1	2	3	4	5	6	7
2.00 %	1	36	48	48	45	50	48	37
	2	47	65	63	56	63	64	47
	3	47	62	64	56	64	64	50
	4	46	56	57	57	61	59	47
	5	47	62	62	59	66	68	51
	6	47	63	63	58	67	72	52
	7	37	47	47	47	50	52	40
Номер сенсора		1	2	3	4	5	6	7
1.50 %	1	36	48	47	45	48	48	37
	2	47	64	63	56	64	65	48
	3	47	62	63	57	65	65	48
	4	45	57	58	56	59	59	47
	5	47	62	62	59	66	69	51
	6	47	64	63	58	68	72	52
	7	37	47	48	47	52	52	40

Окончание таблицы 9

Погрешность	Номер сенсора	1	2	3	4	5	6	7
1.00 %	1	36	48	47	45	48	48	37
	2	47	64	63	56	63	65	48
	3	47	63	63	58	64	64	49
	4	45	57	58	56	60	58	47
	5	47	62	62	59	66	69	52
	6	47	64	63	59	68	71	52
	7	37	47	48	46	50	52	40
	Номер сенсора	1	2	3	4	5	6	7
0.75 %	1	36	48	47	45	48	48	37
	2	47	64	64	57	63	65	48
	3	47	63	63	58	64	64	49
	4	45	56	58	56	60	59	47
	5	47	62	62	59	67	68	51
	6	47	64	63	59	68	71	52
	7	37	48	48	46	51	53	40
	Номер сенсора	1	2	3	4	5	6	7
0.50 %	1	36	47	48	45	48	48	37
	2	47	64	63	56	63	65	48
	3	47	63	63	58	64	65	49
	4	44	56	58	56	60	59	47
	5	47	62	62	56	66	68	51
	6	47	64	63	59	68	71	52
	7	36	47	48	46	51	52	40
						Zначение вне допустимого диапазона		

2. Изменение размеров ячеек виртуальных измерительных приборов

Как было описано выше, измерение освещенности в некоторой точке пространстве в системе оптического моделирования Lumicept проводится с помощью виртуальных измерительных приборов, ячейки которых имеют ненулевую площадь. Были предприняты попытки проводить вычисления с различными размерами ячеек измерительных приборов. Использовались следующие размеры: 10x10 мм и 5x5 мм. В результате эксперимента оказалось, что размеры ячеек не влияют на качество результатов (табл. 10).

Таблица 10. Проведение теста по сценарию 4.2 с различными размерами ячеек измерительных приборов (слева – ячейки 10x10, справа – ячейки 5x5 миллиметров)

погрешн.	position\ sensor	1	2	3	4	5	6	7	погрешн.	position\ sensor	1	2	3	4	5	6	7
0.50%	1	36	47	48	45	48	48	37	0.50%	1	37	47	47	45	49	48	37
	2	47	64	63	56	63	65	48		2	47	64	62	57	63	65	48
	3	47	63	63	58	64	65	49		3	47	63	62	58	63	64	49
	4	44	56	58	56	60	59	47		4	44	56	58	56	60	59	47
	5	47	62	63	56	66	68	51		5	47	63	63	59	67	68	52
	6	47	64	63	59	68	71	52		6	47	64	63	58	68	70	52
	7	36	47	48	46	51	52	40		7	37	48	48	46	51	52	40

3. Изменение степени разбиения геометрии сцены

Как уже было упомянуто, в системе Lumicept предусмотрена возможность автоматического разбиения геометрии сцены с увеличением количества треугольников. Были проведены тесты с уровнем разбиения 5 % и 1 % от исходного размера треугольников. Эксперимент показал, что увеличение разбиения слабо влияет на результаты вычислений (табл. 11).

Таблица 11. Проведение теста по сценарию 4.2 с различной степенью разбиения (слева – разбиение 1 %, справа – разбиение 5 %)

погрешн.	position\sensor	1	2	3	4	5	6	7
0.50%	1	36	47	48	44	48	48	37
	2	47	64	63	56	63	65	48
	3	47	63	62	58	64	65	49
	4	44	57	57	56	59	59	47
	5	47	63	63	59	67	68	51
	6	47	64	63	58	68	70	52
	7	37	48	48	46	51	52	40

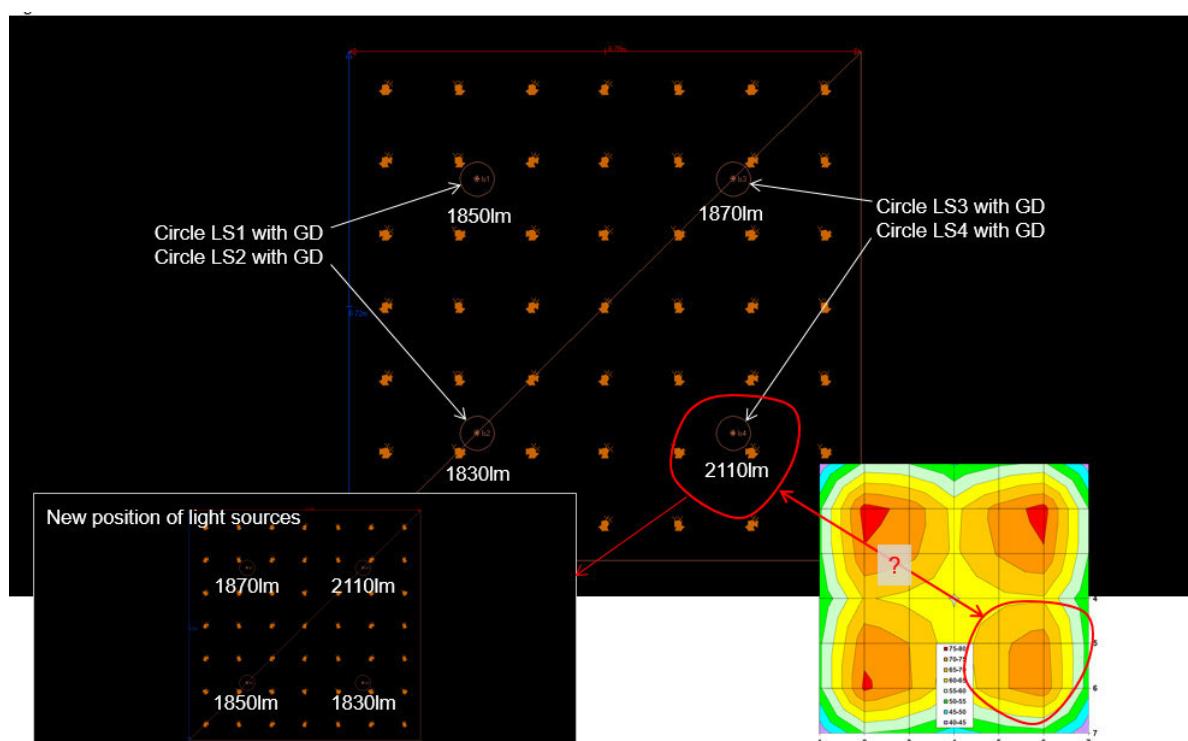
погрешн.	position\sensor	1	2	3	4	5	6	7
0.50%	1	36	48	48	45	49	48	37
	2	48	64	63	56	63	66	48
	3	47	63	63	58	64	64	49
	4	44	56	58	56	60	59	47
	5	47	63	63	60	67	68	51
	6	47	64	63	58	68	71	52
	7	36	47	48	46	52	52	40

Возможные варианты изменения параметров сцены

Как показали практические исследования, методы, которые в большинстве случаев помогают улучшить точность вычислений, практически не улучшили ситуацию для данного конкретного теста. Нами был проведен анализ тестов, проведенных по стандарту CIE 171:2006 для других систем оптического моделирования, в результате чего было обнаружено, что именно тест 4.2 из набора CIE 171:2006 является проблемным для очень многих программ оптического моделирования. В частности, подобные результаты возникли в системе AGi32 [12] и Radiance. В результате проведенного анализа мы делаем предположение, что исходные данные CIE для данного конкретного тестового случая являются не в полной мере корректными. Возможно, не были учтены какие-то дополнительные параметры сцены либо даже приведенные данные содержат какие-то ошибки.

Мы также провели анализ действий, которые предпринимались в исследованиях вышеупомянутых систем оптического моделирования для улучшения результатов в данном тестовом примере. В частности, в работе [12] предлагается рассматривать источники света, имеющие форму круга, в виде шестиугольников и дополнительно дробить их на треугольники. Этот подход позволил добиться снижения ошибки с 9.1 до 3.7 %.

Однако нами было замечено, что в описании тестов CIE заметно некоторое противоречие между положением источника света и распределением освещенности. Зона с минимальной освещенностью находится под более мощным источником света. Поэтому мы провели моделирование с измененным положением источников света (см. рисунок).



Симуляция по сценарию на базе теста 4.2 с измененным положением источников света

Здесь источники света поменялись местами друг с другом. После такой перекомпоновки источников света, как показано на рисунке, сразу же было обнаружено попадание результатов теста в заданные пределы на большинстве ячеек. Исходя из этого, можно сделать предположение, что Международная комиссия по освещению (CIE) предоставила некорректные исходные данные для данного теста.

Сравнение результатов тестирования с другими системами оптического моделирования

Таблица 12 показывает сравнение результатов тестирования системы Lumicept с другими известными системами оптического моделирования – Radiance и AGi32. В качестве критерия сравнения используется среднеквадратичная ошибка (RMSD). Поскольку в тестовых примерах отсутствуют эталонные значения, то вместо них использовалось среднее арифметическое верхнего и нижнего пределов допустимых значений с учетом полной возможной погрешности (TE UL / TE LL).

Таблица 12. Результаты тестирования систем оптического моделирования

Тест	Lumicept	Radiance	AGi32
	RMSD		
4.1	8.8875	11.8591	9.0805
4.2	6.6238	9.3258	6.6943
4.3	11.0112	10.5480	11.6439
4.4	2.6035	2.5703	2.6721
4.5	3.3489	5.4724	2.9119
4.6	11.4216	11.4994	12.6279

Из данной таблицы видно, что в трех тестовых примерах из шести система Lumicept показала наилучшую точность по сравнению с другими известными системами. В остальных трех случаях результаты системы Lumicept имеют примерно одинаковую точность, как и другие системы.

Выводы

Система оптического моделирования Lumicept, вычислительное ядро которой создано специалистами ИПМ и ИТМО, успешно прошла верификацию с использованием тестовых сценариев CIE 171:2006. Результаты в целом продемонстрировали корректное моделирование распространения света, при этом их точность не уступала результатам, полученным для других популярных систем. Из всех тестов только в 2 % случаев ошибка превысила рубеж в 10 %, который считается максимально приемлемым в инженерных расчетах. Анализ отклонений от эталонных значений CIE в проблемных тестах выявил высокую вероятность некорректности исходных данных, поскольку именно в этих тестах подобные чрезмерные отклонения также были обнаружены и для других популярных систем оптического моделирования.

Проведенная работа выявила необходимость дальнейшего исследования для определения причин отклонений в отдельных тестовых сценариях. Результаты могут быть использованы для повышения доверия к системе Lumicept и разработки рекомендаций по её применению, а также для совершенствования методов верификации систем оптического моделирования.

Список литературы

1. Using simulation software calibration tests as a consumer guide—a feasibility study using lighting simulation software / Donn M., et al. 2007.
2. Inanici M., Abboushi B., Safranek S. Evaluation of sky spectra and sky models in daylighting simulations // Lighting Research & Technology. 2023. Vol. 55, no. 6. P. 502-529.
3. Pierson C., Aarts M. P. J., Andersen M. Validation of spectral simulation tools in the context of ipRGC-influenced light responses of building occupants // Journal of Building Performance Simulation. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 179-197.
4. Pierson C., Wienold J., Bodart M. Daylight discomfort glare evaluation with Evalglare: influence of parameters and methods on the accuracy of discomfort glare prediction // Buildings. 2018. Vol. 8, no. 8. P. 94.
5. INLUX: A calculation code for daylight illuminance predictions inside buildings and its experimental validation / De Rosa A., et al. // Building and Environment. 2009. Vol. 44, no. 8. P. 1769-1775.
6. Mardaljevic J. The BRE-IDMP dataset: a new benchmark for the validation of illuminance prediction techniques // Lighting Research & Technology. 2001. Vol. 33, no. 2. P. 117-134.

7. Schregle R., Wienold J. Physical validation of global illumination methods: measurement and error analysis // Computer Graphics Forum. 9600 Garsington Road, Oxford, OX4 2DQ, UK.: Blackwell Publishing Ltd., 2004. Vol. 23, no. 4. P. 761-781.
8. A New Tool and Calculation Methodology for BIM-integrated Rapid Daylight Simulation / Dunn J., et al. (Preliminary Draft for ASHRAE Energy Modeling Conference). 2015
9. Reliable datasets for lighting programs validation–benchmark results / Maamari F., et al. // Solar Energy. 2005. Vol. 79, no. 2. P. 213-215.
10. CIE 171:2006 – Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs. URL: <https://cie.co.at/publications/test-cases-assess-accuracy-lighting-computer-programs> (accessed 05.07.2025).
11. Lumicept – Hybrid Light Simulation Software. URL: <http://www.integra.jp/en> (accessed 29.06.2025).
12. Geisler-Moroder D., Dür A. Validation of radiance against CIE171: 2006 and improved adaptive subdivision of circular light sources //Proceedings 7th International RADIANCE workshop, Fribourg. – 2008.